文章编号:1000-4939(2024)02-0309-09

聚脲材料动态力学性能试验研究

刘文礼,杜修力,李亮,马睿

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室,100124 北京)

摘 要:应用低阻抗分离式霍普金森压杆和拉杆试验装置开展了聚脲材料动态力学性能的试验研究。分别开展了聚脲 8380 材料常温条件(T=18 ℃)下的动态压缩和动态拉伸试验,以及高温(50、80 ℃)和低温(-40、-20 ℃)条件下的动态压缩试验,研究了该种材料的动态压缩和动态拉伸性能,并研究了应变率和温度对材料动态力学性能的影响规律。研究结果表明:在不同温度下,聚脲 8380 材料的动态力学性能均呈现出显著的应变率效应;随着加载应变率的增大,材料的强度、变形能力和耗能能力均有不同程度的提升;聚脲 8380 材料的动态力学性能具有明显的温度相关性,高温和低温条件下材料的动态压缩性能呈现出不同的变化规律;高温条件下聚脲 8380 材料的动态压缩性能发生劣化,其动态抗压强度较常温条件下有较大幅度的降低,随着温度的升高,材料的动态抗压强度降低;低温条件下聚脲 8380 材料的动态压缩性能有显著的改善与提升,其动态抗压强度和耗能能力较常温条件下有大幅度的提高,随着温度的降低,材料的动态抗压强度提高。

关键词:聚脲材料;动态压缩;动态拉伸;应变率

中图分类号:TB302 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.02.005

Experimental study on dynamic mechanical behaviors of polyurea material

LIU Wenli,DU Xiuli,LI Liang,MA Rui

(Key Laboratory of Urban and Security and Disaster,Engineering Ministry of Education,
Beijing University of technology,100124 Beijing,China)

Abstract:An experimental study on the dynamic mechanical properties of polyurea was carried out by using a low impedance split Hopkinson pressure bar and pull rod test device. The dynamic compression and dynamic tensile tests of polyurea 8380 at room temperature (T=18 ℃) and high temperature (50, 80 ℃) and low temperature (-40, -20 ℃) were carried out respectively. The dynamic compression and dynamic tensile properties of the material were studied,and the effects of strain rate and temperature on the dynamic mechanical properties of the material were studied. The results show that: the dynamic mechanical properties of polyurea 8380 have significant strain rate effect at different temperatures. With

收稿日期:2022-06-25 **修回日期**:2022-12-31
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. U1839201)
通信作者:李亮,博士生导师。E-mail:liliang@bjut.edu.cn
引用格式:刘文礼,杜修力,李亮,等. 聚脲材料动态力学性能试验研究[J]. 应用力学学报,2024,41(2):309-317.
LIU Wenli,DU Xiuli,LI liang,et al. Experimental study on dynamic mechanical behaviors of polyurea material[J]. Chinese journal of applied mechanics,2024,41(2):309-317.

the increase of loading strain rate, the strength, deformation capacity and energy dissipation capacity of the material are improved to varying degrees. The dynamic mechanical properties of polyurea 8380 have obvious temperature dependence. The dynamic compressive properties of polyurea 8380 show different changes at high and low temperatures. The dynamic compressive strength of polyurea 8380 is much lower than that at room temperature. With the increase of temperature, the dynamic compressive strength of the material decreases. At a low temperature, the dynamic compressive strength and energy dissipation capacity of polyurea 8380 are significantly improved compared with those at room temperature. With the decrease of temperature, the dynamic compressive strength of the material increases.

Key words: polyurea; dynamic compression; dynamic stretching; strain rate

各类工程结构在其服役期内会由于各种原因，如燃油气爆炸、恐怖袭击等受到爆炸荷载的作用。爆炸产生的冲击波与碎片将对工程结构产生巨大的安全威胁[1]。工程结构的抗爆安全性问题须进行研究。相较于准静态荷载，冲击爆炸荷载具有高强度，低脉宽的特点，因此对防护结构及其构件提出了更高的要求[2-3]。目前大多数结构都是钢筋——混凝土结构，对冲击爆炸荷载的防护有限。提高工程结构抗爆安全性的途径之一是选用特定的材料对结构及其构件进行加固。聚脲材料具有良好的物理力学性质，如具有极高的抗冲击性能[4]、柔韧性、耐磨性、防湿滑、耐老化[5]、防渗漏[6]、耐腐蚀[7]等特性，该材料还具有保温[8]、防水[9-10]抗冻[11]、防止混凝土冻融[12]等功能。已有学者对聚脲材料的抗爆、抗侵蚀性能进行了分析[13-16]。聚脲材料已被广泛应用于各类土木工程结构及其构件，近年来主要应用在混凝土结构[17]抗爆抗冲击防护、裂纹渗透、冻融剥蚀、钢筋锈蚀[18]、加固砖填充墙抗爆[19]、钢结构的抗冲击[20-23]、钢筋混凝土板抗爆[24]和城市地下市政基础设施领域中[25]。

国内外学者针对聚脲材料的静、动态力学性能开展了研究。石光明等[26]利用万能试验机得到了聚脲材料在 0.001 ~ 0.1 s^{-1} 应变率范围内准静态压缩下的应力-应变关系。贾子建[27]得到了应变率为 0.001、0.1 s^{-1} 下的压缩应力-应变关系，同时得到了 0.001 ~ 0.4 s^{-1} 应变率范围内的拉伸应力-应变关系。SHIM 等[28-29]开展了聚脲在高应变率范围内的动态力学性能研究，利用霍普金森压杆（铝材质）设备进行了聚脲材料的动态力学试验，得到了聚脲在不同应变率下的应力-应变曲线。结果表明聚脲具有优异的变形能力和强应变率效应。拉伸性能方面，RAMAN[30]和 MOHOTTI 等[31]利用了 Instron 高速拉伸机得到了材料中应变率 400 s^{-1} 下的单轴拉伸应力-应变关系。代利辉等[32]利用霍普金森拉杆（SHTB）开展了聚脲材料在（600 ~ 1 500 s^{-1}）范围内的高应变率单轴拉伸试验。了解高应变率下该材料的力学性能规律有利于对该材料抗冲击抗爆起到一定的参考作用[30]。

聚脲材料可应用于多种工程结构的抗爆加固，包括建筑结构、桥梁结构和水利工程结构等。由于不同工程结构所处的地区不同以及季节的变化，会使聚脲材料的工作温度有较大范围的变化，可能低至 −40 ℃，也可能高达 80 ℃。在不同的工作温度条件下，聚脲材料的动态力学性能会发生显著的变化。因此，有必要考虑温度和加载速率的耦合，研究不同温度和不同应变率组合条件下聚脲材料的动态力学性能。目前，针对聚脲材料在高应变率与温度耦合条件下率温耦合动态力学性能的研究开展的还不充分，国内外学者针对聚脲做了低温以及常温的率温效应试验。但是对高温与高应变率耦合下的率温效应的试验研究开展较少。本研究将开展此项研究，重点关注高温对聚脲材料力学性能的影响，并研究材料的力学性能随温度变化的规律。聚脲为黏弹性体聚合物，由异氰酸酯组分（A 组分）和合成树脂混合组分（R 组分）[33]经过聚合反应而成。合成组分的配比不同，其反应生成的该材料的力学性能也存在差异。本研究将针对具有高断裂延伸率和优异抗冲击性能的聚脲 8380 材料，开展不同温度条件下的动态压缩与动态拉伸试验，研究该材料的动态力学特性，并研究温度和应变率对其动态力学性能的影响规律。本研究采用了带有温度装置的霍普金森压杆和霍普金森拉杆开展不同温度条件下的动态压缩与拉伸试验的方法，研究温度和应变率对聚脲材料动态力学性能的影响，以期为聚脲材料高应变率下的本构关系提供参考数据。

1　试验概况

1.1　试验装置

采用西北工业大学飞行器结构力学与强度技术国防重点科学实验室的低阻抗分离式霍普金森(Hopkinson)压杆和拉杆装置进行动态压缩和拉伸试验。试验装置如图 1 和图 2 所示。压杆材料采用 45 号钢,入射杆和透射杆的直径均为 19 mm,长度均为 1.2 m。在入射杆和透射杆与试件接触的端部均匀涂抹一薄层二硫化钼,以消除端面摩擦力的影响。拉杆材料为钛合金 TC4,入射杆和透射杆的直径和长度均与压杆相同。由于聚脲材料的波阻抗较低,动态压缩和拉伸试验中均采用灵敏度系数较高的半导体应变片。

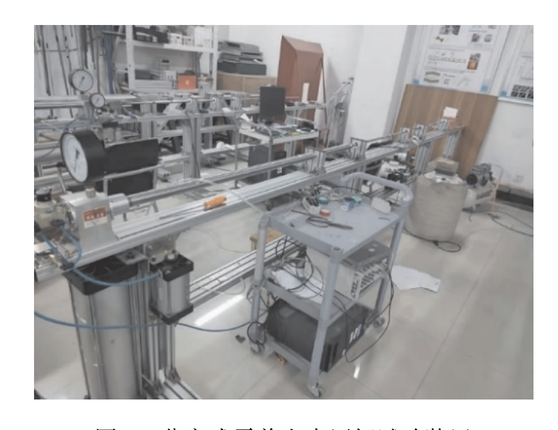


图 1　分离式霍普金森压杆试验装置

Fig. 1　Split Hopkinson pressure bar test device



图 2　分离式霍普金森拉杆试验装置

Fig. 2　Split Hopkinson tensile bar test device

1.2　试验材料与试件设计

本次试验的材料为聚脲 8380 型号材料,其主要的力学性能参数列于表 1。表中参数由江苏江化聚氨酯产品质量检测有限公司提供,是在聚脲材料喷涂完成以后,固化养护 14 d 后测试所得。动态压缩试验的试样为圆柱体,长度为 4 mm,直径为 5 mm。动态拉伸试验的试件为如图 3 所示的狗骨形平板试件,试件中部为有效拉伸段,长度为 4 mm。试件两端的放大段与试验装置连接,有效拉伸段与放大段之间采用圆弧过渡,过渡圆弧段半径为 2 mm。采用 500 mm × 500 mm 的聚脲板,由数控雕铣机进行试件的加工成形。在拉杆试验装置的入射杆和透射杆端部开槽,将带有 M10 螺纹的夹具与入射杆和透射杆连接,将试件通过高强度胶与夹具进行黏接从而实现其与试验装置的连接。这种连接方式可以减少连接界面对试验信号的影响,具有连接紧密、连接接触面少和试验信号稳定等优点[19-20]。试件与夹具黏接后须静置 30 min 以保证黏接胶的强度充分发挥使试件与试验装置的连接牢固。

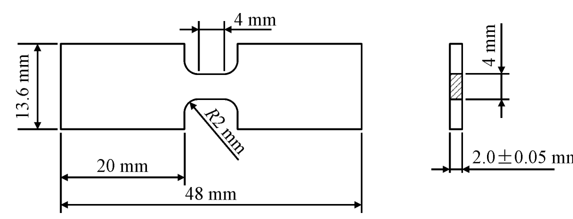


图 3　动态拉伸试验的试件

Fig. 3　Specimen for dynamic tension test

表 1　聚脲 8380 材料力学性能参数

Tab. 1　Mechanical capability parameters of polyuria 8380

密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	拉伸强度/ MPa	撕裂强度/ $(kN \cdot m^{-1})$	断裂延伸/ %
0.995	19.5	72	490

1.3　基本假定

本研究须满足霍普金森杆试验技术的 2 个基本假定:①杆中一维应力波假定;②试件中的应力和应变沿试件长度方向均匀分布假定。基于上述假定,可得试件的应力、应变和应变率分别为

$$\sigma = E\left(\frac{A}{A_s}\right)\varepsilon_T \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{2C_0}{L}\int_0^t \varepsilon_R(t)\,dt \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2C_0}{L}\varepsilon_R \tag{3}$$

$$\varepsilon_I = \varepsilon_R + \varepsilon_T \tag{4}$$

式中: C_0 和 E 分别为杆材料的弹性纵波波速和弹性模量; A 为杆的截面面积; A_s 和 L 分别为试件的初始

截面面积和初始长度；ε_I 、ε_R 和 ε_T 分别对应试件端面的入射波、反射波和透射波，三者的关系由式（4）给出。式(4)也是对霍普金森杆试验结果的有效性进行验证的依据。

1.4 试验方法

本次试验须研究不同温度条件下聚脲材料的动态力学性能。高温试验通过在试件上缠绕电阻丝的方法来控制试件的温度。低温试验在入射杆和透射杆中放置低温环境箱，通过液氮对箱内环境进行降温，采用低温探头测定试样温度。考虑到聚脲材料的导热系数较低，当达到设定的试验温度后，须保持至少10 min以上，以确保试件整体均达到设定的试验温度，然后再进行动态冲击加载。本次试验考虑的温度变化范围为 −40 ~ 80 ℃，在该范围内，入射杆和透射杆弹性模量的变化可以忽略不计，即认为温度变化对波传播特性的影响很小。动态压缩和动态拉伸的典型波形分别如图4和图5所示。由图可知，入射波、反射波和透射波满足式（4）的关系，验证了试验的有效性。此外，由图4可知，反射波趋于平缓状态，基本实现了恒定应变率的加载。在动态拉伸试中，由于试件的断裂会影响透射波的传播，使其不容易被观测和采集。而由图5可知，本研究动态拉伸试验的透射波信号比较稳定。

分别开展常温条件（T = 18 ℃）下聚脲8380材料的动态压缩和动态拉伸试验，以及不同温度条件下的动态压缩试验，动态加载的应变率分别为1 000、2 000、3 000、4 000、5 000 s^{-1}，试验温度分别为 −40、−20、50、80 ℃，研究应变率和温度对聚脲8380材料动态力学性能的影响规律。相对于常温，−40 ℃和 −20 ℃可视为低温，50 ℃和80 ℃可视为高温。

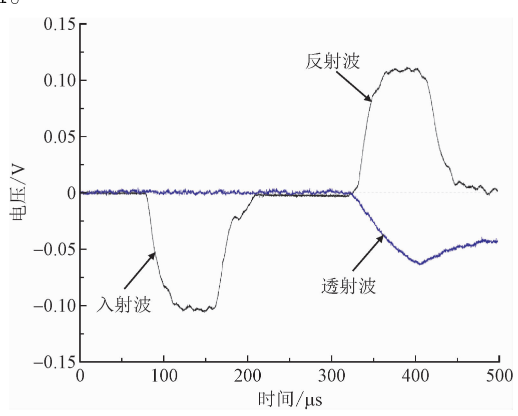


图4 动态压缩波形

Fig. 4 Dynamic compression waveform

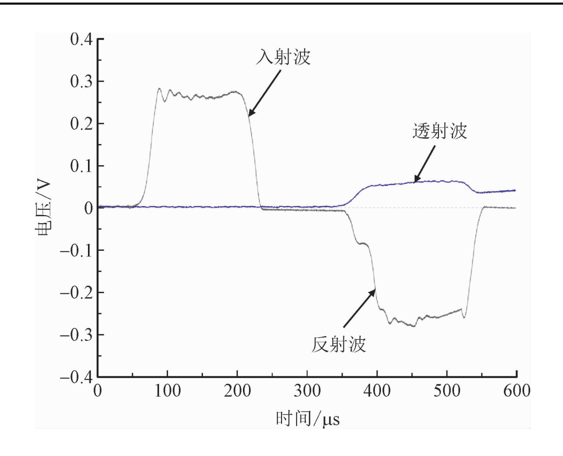


图5 动态拉伸波形

Fig. 5 Dynamic tension waveform

2 试验结果与分析

2.1 常温动态压缩试验

常温条件下（T = 18 ℃），聚脲8380材料的动态压缩试验结果如表2所示，不同应变率条件下动态压缩的应力-应变曲线的对比如图6所示。将应力-应变曲线的最高点对应的应力和应变作为峰值应力和峰值应变，单位体积应变能表征材料在动态压缩条件下的耗能能力，定义为应力-应变曲线与横轴所包围的面积。由表2中试验结果可知，聚脲8380材料的动态压缩性能呈现出明显的应变率效应。随着加载应变率的增大，材料的峰值应力、峰值应变和单位体积应变能均逐渐增大，即材料的动态抗压强度、变形能力和耗能能力均随应变率的增大而逐渐提高。与应变率为1 000 s^{-1}时相比，应变率为2 000、3 000、4 000、5 000 s^{-1}时的峰值应力分别增大了57%、90%、156%、262%，峰值应变分别增大了75%、188%、375%、425%，单位体积应变能分别增大了225%、534%、1 317%、2 077%。

由图6可知，在相对较小的应变率（1 000、2 000 s^{-1}）下，聚脲8380材料的应力-应变曲线包括两段，即初始上升段和峰值应力后的下降段；在相对较大的应变率（3 000、4 000、5 000 s^{-1}）下，材料的应力-应变曲线包括3段，即初始上升段、塑性平台段和峰值应力后的下降段，材料表现出明显的应变硬化特性。此外，随着应变率的增大，塑性平台段起始点的应变逐渐减小。应变率为1 000、2 000、3 000、4 000、5 000 s^{-1}时，塑性平台段起始点的应变分别为8%、7%、6.5%、5.5%、3.5%。

表 2　聚脲 8380 材料常温动态压缩试验结果

Tab. 2　Test results of dynamic compression of polyuria 8380 at ambient temperature

应变率/ s^{-1}	峰值应力/ MPa	峰值应变	单位体积断裂能/ ($kJ \cdot m^{-3}$)
1 000	13.6	0.08	786
2 000	21.4	0.14	2 593
3 000	25.9	0.23	5 010
4 000	34.8	0.38	11 161
5 000	49.2	0.42	17 196

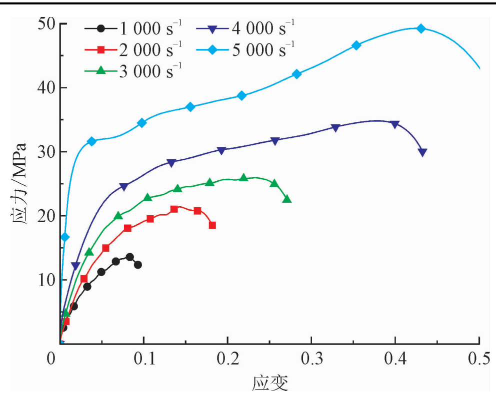


图 6　不同应变率下聚脲 8380 材料常温动态压缩应力-应变曲线对比

Fig. 6　Comparison of dynamic compression stress-strain curves of polyuria 8380 at ambient temperature for different strain rates

2.2　常温动态拉伸试验

常温条件下($T = 18$ ℃),聚脲 8380 材料的动态拉伸试验结果如表 3 所示,不同应变率条件下动态拉伸的应力-应变曲线的对比如图 7 示。峰值应力和峰值应变的定义同动态压缩。断裂能[20]是指试样在动态拉伸作用下裂缝扩展单位面积所需要的能量,其值可换算为应力-应变曲线与 X 轴围成的面积。由表 3 可以看出,聚脲材料的动态拉伸性能呈现出明显的应变率效应。随着应变率的提高,材料的峰值应力、峰值应变和断裂能均明显增大。即表示材料的动态抗拉强度、变形能力和耗能能力均随应变率的增大而逐渐提高。与应变率为1 000 s^{-1}时相比,应变率为 2 000 、3 000、4 000、5 000 s^{-1}时的峰值应力分别增大了 28%、70%、80%、135%,峰值应变分别增大了 67%、255%、300% 和 422%,断裂能分别增大了 95%、426%、571%、1 029%。断裂能随加载应变率增大而增长的幅度最为显著。随着应变率的增大,聚脲材料的强度和变形能力均有提高,二者的叠加导致材料的耗能能力显著提高。

表 3　聚脲 8380 材料常温动态拉伸试验结果

Tab. 3　Test results of dynamic tension of polyuria 8380 at ambient temperature

应变率/ s^{-1}	峰值应力/ MPa	峰值应变	单位体积断裂能/ ($kJ \cdot m^{-1}$)
1 000	8.6	0.09	685
2 000	11.0	0.15	1 336
3 000	14.6	0.32	3 603
4 000	15.5	0.36	4 593
5 000	20.2	0.47	7 736

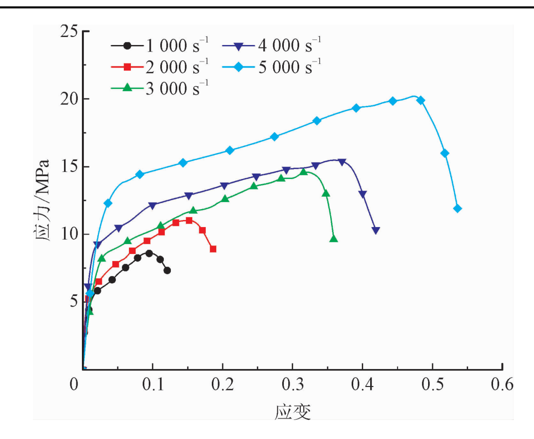


图 7　不同应变率下聚脲 8380 材料常温动态拉伸应力-应变曲线对比

Fig. 7　Comparison of dynamic tension stress-strain curves of polyuria 8380 at ambient temperature for different strain rates

由图 7 可知,聚脲 8380 材料的应力-应变曲线大致包括 3 段。即初始上升段,塑性平台段和峰值应力后的下降段,材料表现出明显的应变硬化效应。试样在相对较小的应变率(1 000、2 000 s^{-1})下卸载以后的形态如图 8 所示。由图可知,卸载以后试样可快速恢复原状。在应变率 1 000 s^{-1}下卸载后材料并无裂缝产生,也未发生尺寸上的变化;在应变率 2 000 s^{-1}下卸载后试样也只产生了几条不明显的微小裂缝。说明材料具有较好的弹性和自愈性能。



(a) 1 000 s^{-1}


(b) 2 000 s^{-1}

图8　卸载后试样破坏形态
Fig. 8　Failure state of specimen after unloading

2.3　高温与低温条件下的动态压缩试验

不同试验温度下聚脲8380材料的动态压缩试验结果如表4所示。各试验温度下不同应变率时聚脲材料动态压缩应力-应变曲线的对比如图9所示。由试验结果可知,与常温条件下相同,聚脲8380材料在高温与低温条件下的动态压缩性能也呈现出显著的应变率效应。在同一试验温度下,随着应变率的增大,材料的动态抗压强度、变形能力和耗能能力均逐渐提高。

同一应变率时,不同试验温度下聚脲材料动态压缩应力-应变曲线的对比如图10所示。由图可知,聚脲8380材料在高温与低温条件下的动态压缩性能呈现不同的规律。在高于常温的高温条件(50、80 ℃)下,聚脲材料的应力随着应变的增大缓慢上升,其动态压缩的应力-应变曲线呈现应变硬化的规律。随着温度的升高,材料的峰值应力减小,峰值应变差别并不大,即随着温度的升高,材料的动态抗压强度降低,变形能力近乎不变。同时,高温条件下聚脲材料的动态抗压强度较常温条件下有较大幅度的降低,50、80 ℃时的峰值应力分别比常温条件下降低了约65%和80%,高温作用使聚脲材料的动态压缩性能发生劣化。在实际试验中,高温动态压缩结束后可观察到材料发生了明显的软化现象。在低于常温的低温条件(−40、−20 ℃)下,聚脲材料的应力随着应变的增大先迅速上升,达到峰值后随着应变的增大出现不同程度的降低,其动态压缩的应力-应变曲线呈现应变软化的规律。除应变率为1 000 s^{-1}的工况以外,其他应变率的加载条件下的应力-应变曲线均有明显的下降段。随着温度的降低,材料的峰值应力增大,−40 ℃的峰值应力比−20 ℃时增大了约32%,即随着温度的降低,材料的动态抗压强度提高。同时,低温条件下聚脲材料的动态抗压强度较常温条件下有大幅度的提高,−20 ℃的动态抗压强度大约是常温条件的3倍,−40 ℃的动态抗压强度可达常温条件的4倍。低温条件下材料的耗能能力也较常温条件下有显著的提高。低温条件下聚脲材料的动态压缩性能有显著的改善与提升。原因在于低温条件下聚脲材料会发生从橡胶态向玻璃态的转变,其硬度提高,抗压性能改善。与混凝土类材料相比,聚脲材料的动态力学性能受温度影响的程度更大,其动态力学性能随温度的变化更加显著。

表4　不同试验温度下聚脲8380材料动态压缩试验结果

Tab. 4　Test results of dynamic compression of polyuria 8380 at different temperatures

温度/℃	应变率/s^{-1}	峰值应力/MPa	峰值应变	单位体积断裂能/($kJ \cdot m^{-3}$)
−40	1 000	46.1	0.077	2 414.6
	2 000	63.5	0.067	7 961.1
	3 000	75.7	0.062	14 266.4
	4 000	98.0	0.051	25 031.9
	5 000	117.5	0.041	40 685.9
−20	1 000	37.3	0.083	2 327.3
	2 000	51.3	0.086	5 031.7
	3 000	57.7	0.068	11 301.8
	4 000	66.6	0.065	18 199.7
	5 000	87.4	0.347	29 544.8
50	1 000	5.6	0.104	391.4
	2 000	7.8	0.160	888.6
	3 000	9.7	0.226	1 727.5
	4 000	11.6	0.306	2 696.0
	5 000	13.0	0.399	4 567.9
80	1 000	2.5	0.084	139.1
	2 000	4.6	0.151	489.1
	3 000	5.2	0.193	752.4
	4 000	6.9	0.307	1 550.1
	5 000	8.3	0.379	2 747.3

由试验结果可知,在高温和低温条件下,聚脲材料呈现出不同的力学响应特性,即在高温下呈现应

变硬化而在低温下呈现应变软化的规律。原因在于聚脲材料是一种黏弹性材料,受温度影响,其力学性能变化较大。随着温度的变化,黏弹性材料弹性模量变化较大。且聚脲弹性体随温度的增加,聚合物从玻璃态行为逐渐转变为橡胶态行为,所以材料呈现了从高温条件的应变硬化到低温条件的应变软化的特性。

(a) T=−40 ℃　(b) T=−20 ℃　(c) T=18 ℃　(d) T=50 ℃　(e) T=80 ℃

图 9　同一温度下不同应变率聚脲 8380 材料动态压缩应力-应变曲线对比

Fig. 9　Comparison of dynamic compression stress-strain curves of polyuria 8380 for different strain rates

(a) $\dot{\varepsilon}$=1 000 s^{-1}　(b) $\dot{\varepsilon}$=2 000 s^{-1}　(c) $\dot{\varepsilon}$=3 000 s^{-1}　(d) $\dot{\varepsilon}$=4 000 s^{-1}　(e) $\dot{\varepsilon}$=5 000 s^{-1}

图 10　不同试验温度下聚脲 8380 材料动态压缩应力-应变曲线对比

Fig. 10　Comparison of dynamic compression stress-strain curves of polyuria 8380 at different test temperatures

3 结　论

本研究应用低阻抗分离式霍普金森压杆和拉杆试验装置开展了聚脲材料动态力学性能的试验研究。分别开展了聚脲8380材料常温条件($T=18$ ℃)下的动态压缩和动态拉伸试验，以及高温（50、80 ℃）和低温（−40、−20 ℃）条件下的动态压缩试验，研究了该种材料的动态压缩和动态拉伸性能，并研究了应变率和温度对材料动态力学性能的影响规律。得到如下主要结论。

1）在不同的温度条件下，聚脲8380材料的动态力学性能均呈现出显著的应变率效应。随着加载应变率的增大，材料的强度、变形能力和耗能能力均有不同程度的提升。

2）聚脲8380材料的动态力学性能具有明显的温度相关性，高温和低温条件下材料的动态压缩性能呈现出不同的变化规律。

3）高温条件下聚脲8380材料的动态压缩性能发生劣化，其动态抗压强度较常温条件下有较大幅度的降低。随着温度的升高，材料的动态抗压强度降低。高温条件下材料的动态压缩应力-应变曲线呈现应变硬化的规律。

4）低温条件下聚脲8380材料的动态压缩性能有显著的改善与提升，其动态抗压强度和耗能能力较常温条件下有大幅度的提高。随着温度的降低，材料的动态抗压强度提高。低温条件下材料的动态压缩应力-应变曲线呈现应变软化的规律。

参考文献：

[1] 李洪祥，陶俊林，卢永刚，等.爆炸作用下玻璃碎片云轮廓扩展数据拟合研究[J].兵器装备工程学报，2016，37(5)：129-134.
LI Hongxiang，TAO Junlin，LU Yonggang，et al. Glass debris cloud contour extend calculation method research under the explosion [J]. Journal of ordnance equipment engineering，2016，37(5)：129-134(in Chinese).

[2] RAMAN S N，NGO T D，MENDIS P A. A review on the use of polymeric coatings for retrofitting of structural elements against blast effects[J]. Electronic journal of structural engineering，2011，11：69-80.

[3] 鲁向辉，周春桂，王志军，等.爆炸载荷下装甲车辆的动态响应分析[J].含能材料，2013，21(5)：624-628.
LU Xianghui，ZHOU Chungui，WANG Zhijun，et al. Dynamic response analysis of an armored vehicle under explosive loading[J]. Chinese journal of energetic materials，2013，21(5)：624-628(in Chinese).

[4] 郭国吉，陈彩英，王向明，等.聚脲弹性体防护材料的研究进展[J].中国表面工程，2021，34(6)：1-20.
GUO Guoji，CHEN Caiying，WANG Xiangming，et al. Research progress of polyurea elastomer protective materials[J]. China surface engineering，2021，34(6)：1-20(in Chinese).

[5] 张月，孙鹏飞，吕平，等.自然曝晒条件下聚脲涂层的耐老化性能研究[J].材料导报，2022，36(2)：216-223.
ZHANG Yue，SUN Pengfei，LÜ Ping，et al. Research on the anti-aging performance of polyurea coating under natural exposure[J]. Materials reports，2022，36(2)：216-223(in Chinese).

[6] 白洋.棋盘山水库输水洞渗漏处理方案研究[J].东北水利水电，2022，40(1)：13-15.
BAI Yang. Study on treatment scheme of water tunnel seepage in Qipanshan Reservoir[J]. Water resources & hydropower of northeast china，2022，40(1)：13-15(in Chinese).

[7] 唐澄宇，边建厂，王海龙.钢制水箱聚脲防腐层施工难点分析及控制[J].科技与创新，2021(21)：93-94.
TANG Chengyu，BIAN Jianchang，WANG Hailong. Analysis and control of construction difficulties of polyurea anti-corrosion layer of steel water tank[J]. Science and technology & innovation，2021(21)：93-94(in Chinese).

[8] 庹建华，黄正海.高寒地区水电站大坝混凝土表面的防渗和保温施工[J].四川水力发电，2020，39(增刊2)：90-93.
TUO Jianhua，HUANG Zhenghai. Anti-seepage and thermal insulation construction of dam concrete surface of hydropower stations in alpine region[J]. Sichuan water power，2020，39(S2)：90-93(in Chinese).

[9] 王宝柱，郭磊，岳长山，等.喷涂聚脲防水涂料在市政环保工程中的应用[J].中国建筑防水，2020(增刊1)：16-19.
WANG Baozhu，GUO Lei，YUE Changshan，et al. Application of spray polyurea waterproofing coating in municipal environmental protection works[J]. China building waterproofing，2020(S1)：16-19(in Chinese).

[10] 杨霞，仲小亮.城市污水环境下防水防腐涂层的老化性能研究[J].中国建筑防水，2022(4)：5-12.
YANG Xia，ZHONG Xiaoliang. Study on aging performance of waterproofing and anti-corrosion coating in urban sewage environment [J]. China building waterproofing，2022(4)：5-12(in Chinese).

[11] 刘嵘嵘.综合管廊聚脲复合涂料防水体系研究与应用[J].中国建筑防水，2022(4)：46-50.
LIU Rongrong. Research and application of polyurea composite coating waterproofing system for utility tunnel[J]. China building waterproofing，2022(4)：46-50(in Chinese).

[12] 孟伟龙.高性能改性聚合物修补砂浆结合聚脲涂料在冻融剥蚀修复工程上的应用[J].黑龙江水利科技，2021，49(5)：172-174.
MENG Weilong. Application of high performance modified polymer repair mortar combined with polyurea coating in freeze-thaw denudation repair engineering[J]. Heilongjiang hydraulic science and technology，2021，49(5)：172-174(in Chinese).

[13] 肖毅华，吴和成.弹体形状对陶瓷/聚脲复合板抗侵彻性能影

响的数值模拟[J]. 应用力学学报,2021,38(2):750-755.
XIAO Yihua,WU Hecheng. Numerical simulation of effects of projectile shape on ballistic resistance of ceramic/polyurea composite plates[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(2):750-755(in Chinese).

[14] 方志强,吕平,张锐,等. 抗爆型聚脲涂层的性能及其抗爆机理[J]. 高压物理学报,2022,36(2):41-50.
FANG Zhiqiang,LÜ Ping,ZHANG Rui,et al. Blast-resistant properties and mechanism of anti-explosion polyurea coating[J]. Chinese journal of high pressure physics,2022,36(2):41-50(in Chinese).

[15] 方志强,吕平,王旭,等. 聚脲涂层防爆罐抗爆性能研究[J]. 涂料工业,2022,52(2):71-77.
FANG Zhiqiang,LÜ Ping,WANG Xu,et al. Blast mitigation properties of explosion-proof tanks with polyurea coatings[J]. Paint & coatings industry,2022,52(2):71-77(in Chinese).

[16] 贾艺凡,陶西贵. 聚脲弹性体喷涂不同砌体墙的抗爆性能研究[J]. 新型建筑材料,2021,48(12):171-174.
JIA Yifan,TAO Xigui. Study on explosion resistance of different masonry walls sprayed with polyurea elastomer[J]. New building materials,2021,48(12):171-174(in Chinese).

[17] 蔡桂杰. 弹性体涂覆钢筋混凝土板抗爆作用设计方法研究[D]. 太原:中北大学,2015.

[18] 王静雯. 面板坝涂覆型结构止水施工工艺的分析及应用[J]. 水利科学与寒区工程,2022,5(2):78-81.
WANG Jingwen. Analysis and application on water stop construction technology for slab dam with coated structure[J]. Hydro science and cold zone engineering,2022,5(2):78-81(in Chinese).

[19] 许林峰,陈力,李展,等. 聚脲加固砖填充墙抗爆性能的试验和分析方法研究[J]. 爆炸与冲击,2022,42(7):124-135.
XU Linfeng,CHEN Li,LI Zhan,et al. Experimental and analytical study on blast resistance performance of brick infill walls strengthened with polyuria[J]. Explosion and shock waves,2022,42(7):124-135(in Chinese).

[20] 鲁向辉,周春桂,王志军,等. 爆炸载荷下装甲车辆的动态响应分析[J]. 含能材料,2013,21(5):624-628.
LU Xianghui,ZHOU Chungui,WANG Zhijun,et al. Dynamic response analysis of an armored vehicle under explosive loading[J]. Chinese journal of energetic materials,2013,21(5):624-628(in Chinese).

[21] CHEN J,DAWE D J,WANG S. Nonlinear transient analysis of rectangular composite laminated plates[J]. Composite structures,2000,49(2):129-139.

[22] ZHANG X T,WANG R Q,LI Q M. Modeling of hypervelocity impact of sandwiched open cell aluminum foam[J]. Procedia engineering,2017,204:262-269.

[23] 化仟仟. 喷涂聚脲弹性体 H 型钢柱抗冲击性能研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2021.

[24] 孙鹏飞,吕平,黄微波,等. 喷涂抗爆型聚脲钢筋混凝土板抗爆性能研究[J]. 材料导报,2021,35(增刊2):642-648.
SUN Pengfei,LÜ Ping,HUANG Weibo,et al. Research of explosion resistance of sprayed anti-blast polyurea reinforced concrete slab[J]. Materials reports,2021,35(S2):642-648(in Chinese).

[25] 王宝柱,赵玉明,岳长山,等. 喷涂聚脲在城市地下市政基础设施中的应用[J]. 隧道与轨道交通,2021(增刊2):126-128.
WANG Baozhu,ZHAO Yuming,YUE Changshan,et al. Application of sprayed polyurea in urban underground municipal infrastructure[J]. Tunnel and rail transit,2021(S2):126-128(in Chinese).

[26] 石光明,刘春美,冯顺山,等. 高弹性体复合材料动态力学性能试验研究[C]//第十二届全国冲击动力学学术会议论文集. 宁波:中国力学学会,2015:182-184.

[27] 贾子健. 强动载荷下聚脲涂覆钢复合结构防护效应研究[D]. 太原:中北大学,2019.

[28] SHIM J,MOHR D. Using split Hopkinson pressure bars to perform large strain compression tests on polyurea at low,intermediate and high strain rates[J]. International journal of impact engineering,2009,36(9):1116-1127.

[29] SHIM J. Finite strain behavior of polyurea for a wide range of strain rates[D]. Cambridge:Massachusetts Institute of Technology,2010.

[30] RAMAN S N,NGO T,LU J,et al. Experimental investigation on the tensile behavior of polyurea at high strain rates[J]. Materials & design,2013,50:124-129.

[31] MOHOTTI D,ALI M,NGO T,et al. Strain rate dependent constitutive model for predicting the material behaviour of polyurea under high strain rate tensile loading[J]. Materials & design,2014,53:830-837.

[32] 代利辉,吴成,安丰江,等. 水下爆炸载荷作用下聚脲材料对钢结构防护效果研究[J]. 中国测试,2018,44(10):157-163.
DAI Lihui,WU Cheng,AN Fengjiang,et al. Investigation on the protection effect of polyurea-coated steel plates at underwater explosive loading[J]. China measurement & test,2018,44(10):157-163(in Chinese).

[33] 黄微波. 喷涂聚脲弹性体技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

（编辑　李坤璐）